

# PROTECCIÓN RADIOLÓGICA OCUPACIONAL EN LA PUESTA EN MARCHA DEL LABORATORIO MOCK UP

Giomi, A., Suarez Prieto, F.

Comisión Nacional de Energía Atómica

## RESUMEN

En la naturaleza, el Uranio natural está constituido principalmente por tres isotopos: U-238, U-235 y U-234. El porcentaje en masa de cada uno de los mismos es 99,28% de U-238, 0,72% de U-235 y 0,0055% U-234.

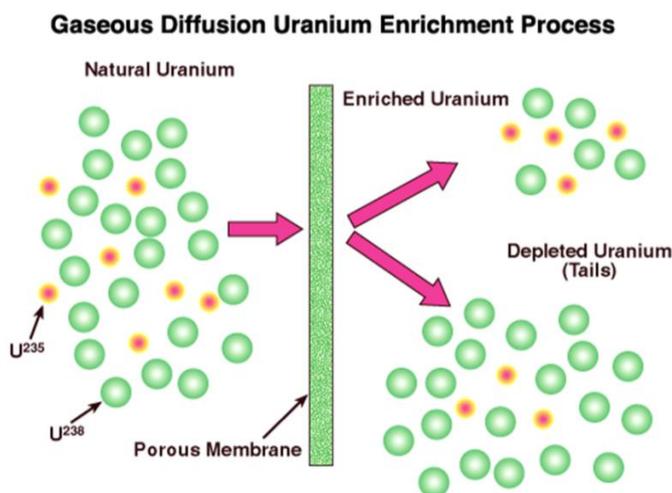
El proyecto Pilcaniyeu consiste en enriquecer el Uranio natural a través del método de difusión gaseosa, aumentando la concentración de U-235 respecto de su porcentual en la naturaleza.

El Complejo Tecnológico Pilcaniyeu, donde está ubicado el Laboratorio Mock Up, es una instalación perteneciente a la Comisión Nacional de Energía Atómica ubicada en la Provincia de Río Negro, en el paraje Pichileufú Arriba, a 60 km. de Bariloche.

La Protección Radiológica ocupacional durante la puesta en marcha, constituye tareas de carácter informativo que tienen como objetivo suministrar cualquier información que permita dilucidar alguna advertencia futura durante las prácticas que conlleven exposición a las radiaciones ionizantes. Esto permite que las prácticas se realicen con la mayor seguridad y protección, de forma tal, que se minimicen al máximo la exposición, el riesgo y la afectación del personal expuesto.

## 1. INTRODUCCIÓN

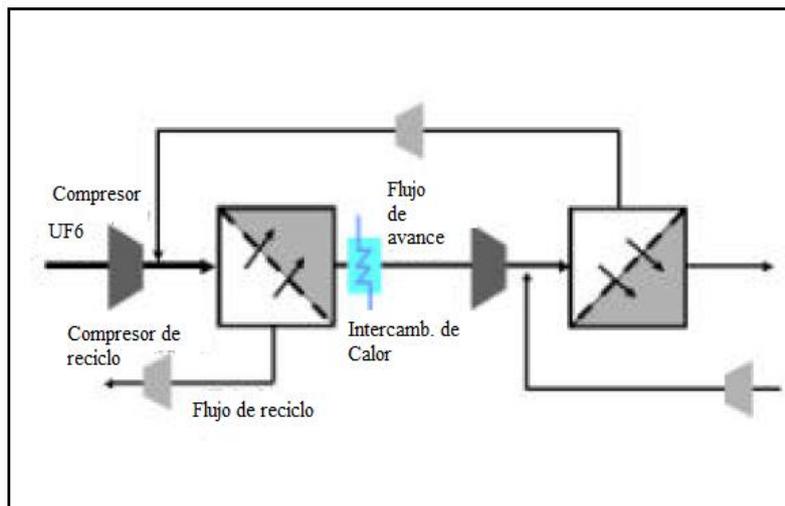
El proceso comienza con la explotación minera del Uranio. El Uranio extraído del suelo es concentrado en lo que se denomina torta amarilla ( $U_3O_8$ ). Luego se lo convierte en gas mediante la combinación entre el  $U_3O_8$  y la fluorina produciendo el  $UF_6$ . Este último se condensa, solidifica y transforma en polvo para llevarlo a la planta de enriquecimiento. El  $UF_6$ , que sublima a  $57^\circ C$ , se hace pasar por membranas que filtran el gas permitiendo aumentar el porcentaje de U-235 respecto al Uranio natural (**Fig. 1**).



**Fig. 1: Proceso de difusión gaseosa.**

La separación isotópica, que se logra en una única etapa de difusión, es extremadamente pequeña por lo que, para alcanzar un aumento apreciable del contenido de U-235 en el  $UF_6$ , resulta necesario repetir el proceso un gran número de veces. Para ello se utiliza una configuración denominada “cascada” en las que las unidades de difusión están conectadas en serie.

En el caso de la Planta de Enriquecimiento, el módulo de difusión gaseosa consta de 20 etapas en serie, donde una porción del gas que ingresa a la unidad difunde a través de membranas de separación isotópica y pasa a la unidad siguiente formando la denominada corriente de avance. El gas depletado, que no atravesó la membrana, es recirculado a la unidad anterior dando lugar a corriente de reciclo (**Fig. 2**).



**Fig. 2: Porción de la cascada de difusión gaseosa**

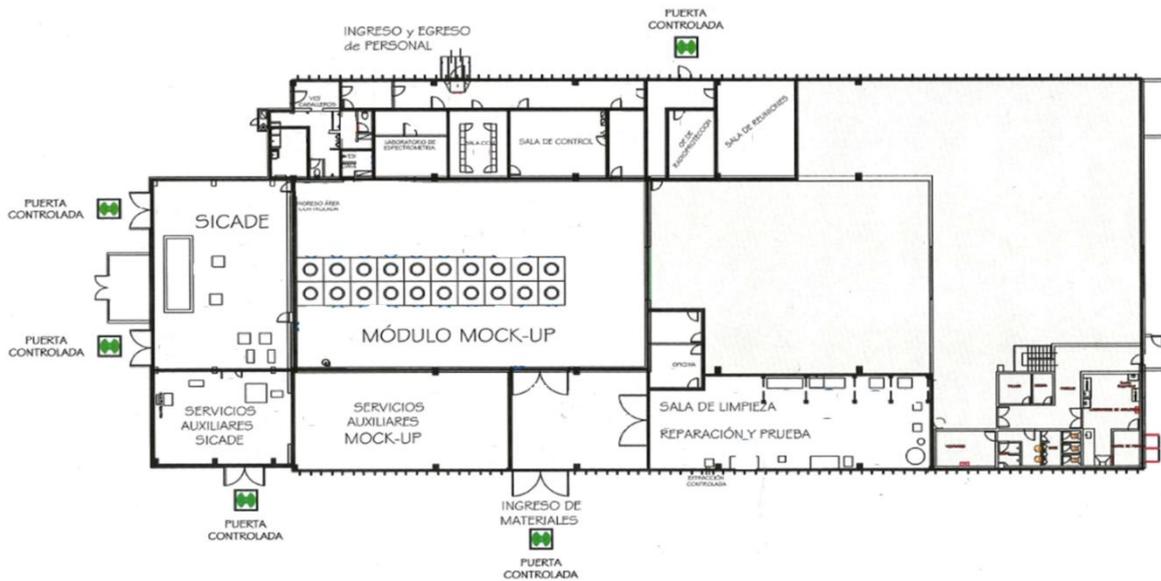
## 2. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

En la Planta de enriquecimiento por difusión gaseosa se destacan tres áreas de interés radiológico:

- **ESTACION SICADE:** Aquí se realiza la recepción, muestreo, almacenamiento y conexión a cascada de los cilindros con  $UF_6$ , por lo que hay presencia de Uranio. Se considera un lugar crítico en cuanto a la protección radiológica.
- **MODULO MOCK UP:** Aquí se encuentran los 20 difusores gaseosos. Es el área donde se realiza la toma de muestras de  $UF_6$  para el control del proceso y tareas de mantenimiento. Se considera como área activa aquella en la cual están los difusores y equipos anexos.
- **TALLER DE REPARACIÓN DE COMPRESORES:** Está área es menos crítica a nivel de la protección radiológica en comparación con los sectores anteriores. Aquí realizan operaciones programadas de mantenimiento de equipos, los cuales son descontaminados in situ y luego pasan al taller, de manera de llegar con la

menor contaminación posible. Posee una mesada de trabajo, la cual es el lugar más crítico desde el punto de vista de la protección radiológica.

A continuación (**Fig. 3**) se presenta un esquema de la instalación:



**Fig. 3: Plano de la instalación**

### 3. PROPIEDADES DEL UF<sub>6</sub>

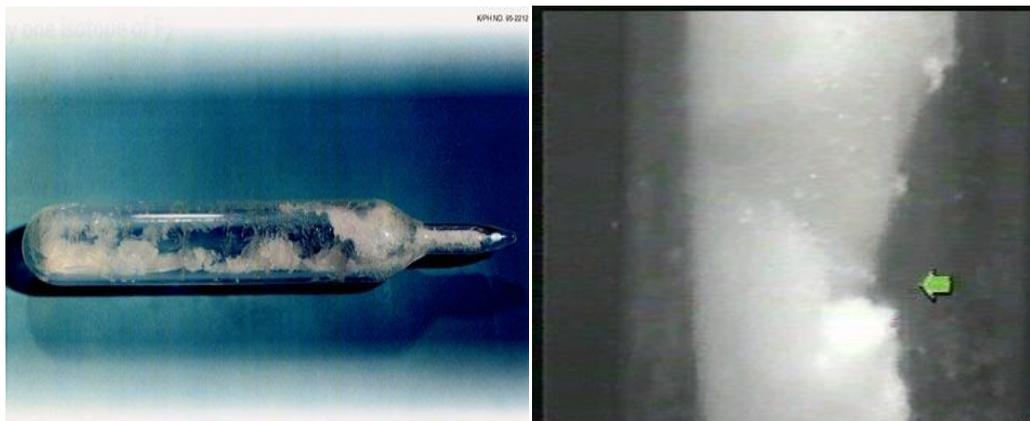
El UF<sub>6</sub> es altamente corrosivo y reacciona exotérmicamente con la humedad del ambiente. Por éste motivo, en forma previa al inicio de la operación con hexafluoruro de Uranio, se realiza la etapa llamada “pasivado”, que consiste en el pasaje de fluoruros por las cañerías del sistema generando una película protectora y reduciendo la reacción del UF<sub>6</sub> con posibles vestigios de humedad en el sistema.

Uno de los principios generales de seguridad más importantes aplicados en el diseño y la operación del Laboratorio Mock Up, es que la presión de trabajo en cualquier punto del proceso de la cascada debe permanecer sub-atmosférica, por lo que cualquier pequeña fuga tenderá a ingresar al sistema debido a la presión negativa. Es decir, en caso de perderse la contención del UF<sub>6</sub> por alguna pérdida de estanqueidad en el equipamiento de proceso, se produce el ingreso de aire al sistema en lugar de la liberación del mismo a la atmósfera de trabajo. En particular, el proceso se mantiene a presiones sub-atmosféricas a través de un sistema de vacío con redundancia de sus bombas y el aseguramiento del suministro de energía eléctrica. También existe redundancia de instrumentos de medición de presión para la detección de la pérdida de estanquidad del proceso en la cascada.

Por otra parte, es necesario contar con una línea de nitrógeno gaseoso (3 bar) para el barrido del UF<sub>6</sub> del equipamiento de proceso y de las líneas de conexión, de manera de

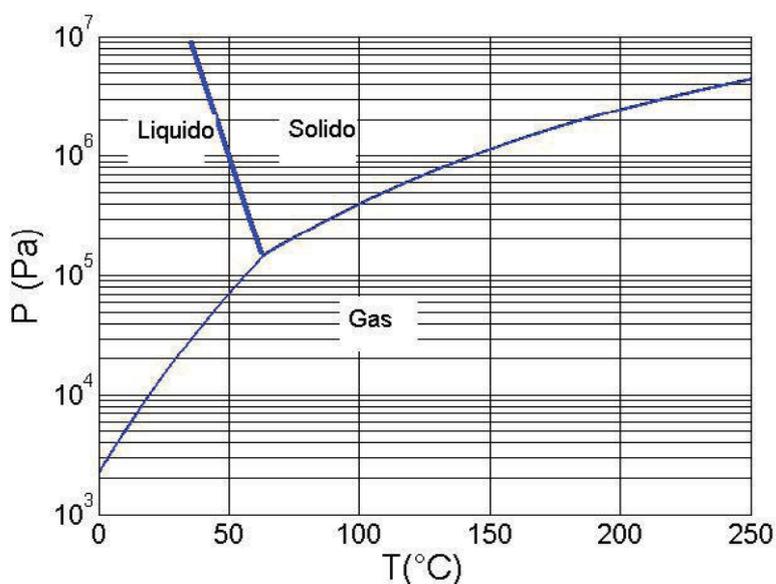
eliminar los vestigios de  $\text{UF}_6$  que, a temperatura ambiente, podrían convertirse en un sólido, produciendo el bloqueo de las conexiones.

Para evitar reacciones indeseables del  $\text{UF}_6$  con los materiales orgánicos (algunas de las cuales son explosivas), se utilizan aceites completamente fluorados, que son inertes al  $\text{UF}_6$ , para la lubricación de compresores y bombas de vacío.



**Fig. 4:** A la izquierda Cristales del  $\text{UF}_6$  y a la derecha la sublimación

El  $\text{UF}_6$  líquido se forma sólo a temperaturas mayores de  $64\text{ }^\circ\text{C}$  y a presiones mayores de 1,5 veces la presión atmosférica. A presión atmosférica, el  $\text{UF}_6$  sólido (cristal blanco y denso que se asemeja a la sal de roca) (**Fig.4**) se transforma directamente a gas, mediante el proceso de sublimación, cuando la temperatura se eleva a  $57\text{ }^\circ\text{C}$ , sin pasar por una fase líquida. Estas propiedades se muestran en el diagrama de fases (**Fig. 5**), que presenta los diferentes estados del  $\text{UF}_6$  en función de la temperatura y la presión.



**Fig. 5:** Diagrama de Fases del  $\text{UF}_6$

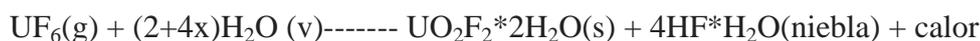
Debido a que la temperatura del ambiente en el SICADE es de aproximadamente 20 °C, todas las líneas que transportan el gas de proceso en esta área, son calefaccionadas para evitar la desublimación del UF<sub>6</sub> en las zonas frías, lo que podría ocasionar taponamientos de las cañerías o equipos.

### 3.1 Hidrólisis del Hexafluoruro de Uranio

Como se mencionó con anterioridad, el UF<sub>6</sub> en estado gaseoso puede reaccionar rápidamente con la humedad del ambiente y formar compuestos solubles de Uranio: UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> y HF. Debido a esto, el UF<sub>6</sub> siempre se maneja en contenedores sellados y equipos de procesamiento adecuados para evitar que reaccione con la humedad del ambiente. La reacción de UF<sub>6</sub> gaseoso con vapor de agua a temperaturas elevadas es la siguiente:



A temperatura ambiente, dependiendo de la humedad relativa del aire, se obtienen los siguientes productos de reacción: el UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> hidratado y HF-H<sub>2</sub>O en forma de niebla. La reacción es la siguiente:



Es decir, la humedad cumple un papel muy importante, ya que a baja humedad no se forma la niebla blanca, y sólo se forma una bruma tenue.

## 4. RIESGOS ASOCIADOS AL UF<sub>6</sub>

Los riesgos asociados al manejo de compuestos de Uranio están relacionados con diversos parámetros:

- el estado físico,
- la composición química
- el enriquecimiento.

En la Planta de Enriquecimiento ingresa Uranio natural como UF<sub>6</sub> en estado sólido, luego mediante calentamiento controlado pasa a UF<sub>6</sub> gaseoso.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, los riesgos presentes en la instalación se pueden dividir en dos tipos: riesgos toxicológicos y riesgos radiológicos.

### 4.1 Riesgos toxicológicos

El UF<sub>6</sub> se libera a la atmósfera y reacciona con la humedad del aire formando compuestos solubles de Uranio (UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> y HF) ambos perjudiciales a la salud. El Fluoruro de Uranilo (UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>) es un material particulado fino y el HF es un fuerte

oxidante y muy destructivo para el tejido humano pudiendo dañar pulmones si es inhalado en elevadas concentraciones.

Debido a la gran problemática toxicológica asociada con el HF, se estableció que la concentración máxima en el aire (considerando una jornada de 8 horas y 40 horas semanales) no debe superar 3 ppm (2,5 mg HF/m<sup>3</sup> de aire). Esto permite limitar sus efectos nocivos por incorporación crónica.

Incorporar UF<sub>6</sub> y sus productos de hidrólisis (UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> y HF) produce:

- **Toxicidad química del Uranio soluble:** El Uranio es un metal pesado por lo que afecta a los riñones provocando disfunciones renales. El fluoruro de Uranilo (UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>) producido por la hidrólisis del UF<sub>6</sub> es un compuesto soluble de finas partículas que al ser inhalado, una fracción importante, por el hombre llega a los pulmones y no se exhala inmediatamente. Es decir, el 50% de la cantidad incorporada se disuelve en el torrente sanguíneo y es llevado a los riñones donde queda retenido en los tejidos, causando daño y conduciendo a la pérdida de funcionalidad de los mismos.
- **Toxicidad química del HF:** El HF producido por la hidrólisis del UF<sub>6</sub> es un líquido fumante o un vapor dependiendo de la temperatura, muy corrosivo y que ataca al tejido humano. Exposiciones moderadas producen desde un olor desagradable que no afecta a nivel salud hasta irritación de la piel y mucosas. Exposiciones más agudas pueden provocar destrucción progresiva de la membrana bronquial y el hinchado del tejido muscular.
- **Toxicidad química del ión fluoruro:** Los iones fluoruro provenientes del UF<sub>6</sub> y sus productos de hidrólisis pueden penetrar la piel y destruir el tejido debajo de ella y causar la inhibición de enzimas vitales, como perturbaciones en el metabolismo cuando se unen con iones Calcio o Magnesio. Altas concentraciones de iones fluoruros llevan a la muerte por envenenamiento.

Es decir, los individuos expuestos al UF<sub>6</sub> y sus productos de hidrólisis pueden sufrir quemaduras en piel.

La Ley Nacional 19587 de Higiene y Seguridad en el Trabajo, coincidente con las normas internacionales, considera que la concentración límite de Uranio en aire desde el punto de vista toxicológico es 0,2 mgU/m<sup>3</sup> (5,2 Bq/m<sup>3</sup>) para exposiciones crónicas.

## 4.2 Riesgo Radiológico

El UF<sub>6</sub> es un compuesto de Uranio. El Uranio es un metal de alta densidad (18,9 g/cm<sup>3</sup>). La corteza terrestre contiene un promedio de alrededor de 3 ppm (3 g/ton) de Uranio, y en agua de mar de aproximadamente 3 ppb (3 mg/ton). En la naturaleza, el Uranio está constituido por tres isótopos (**Tabla 1**): U-238, U-235, y U-234.

**Tabla 1: Propiedades de cada isótopo de Uranio natural**

PROPIEDADES	U-234	U-235	U-238
Vida media	244500 años	$703,8 \times 10^6$ años	$4,468 \times 10^9$ años
Actividad específica	231, 3 MBq/g	80.011 Bq/g	12.445 Bq/g
Masa de Uranio	0,0053%	0,711%	99,284%

En la **Tabla 1** se observa que, por unidad de masa de Uranio natural, el 99,284 % es U-238, el 0,711% U-235, y 0,0085% U-234. La relación U-238/U-235 es constante en la corteza terrestre, salvo ciertas excepciones, como en los yacimientos donde existen evidencias de que hace unos 2000 millones de años se produjeron reactores nucleares naturales.

En la cadena de desintegración (**Tabla 2**), el U-238 y el U-235 son cabezas de serie de dos familias radiactivas diferentes dando como producto estable final dos isótopos de Plomo diferentes, mientras que el U-234 es hija de la cadena de desintegración del U-238.

**Tabla 2: Cadena de desintegración del U-238 y U-235.**

Nucleído	Vida media	Tipo de radiación*	Nucleído	Vida media	Tipo de radiación
<b>U-238</b>	4.468 · 10 <sup>9</sup> años	alfa-gamma	<b>U-235</b>	703.8 · 10 <sup>6</sup> años	alfa-gamma
Th-234	24.1 días	beta-gamma	Th-231	25.52 horas	beta-gamma
Pa-234m	1.17 minutos	beta-gamma	Pa-231	32,760 años	alfa-gamma
<b>U-234</b>	244,500 años	alfa-gamma	Ac-227	21.773 años	beta-gamma
Th-230	77,000 años	alfa-gamma	Th-227	18.718 días	alfa-gamma
Ra-226	1,600 años	alfa-gamma	Ra-223	11.434 días	alfa-gamma
Rn-222	3.8235 días	alfa-gamma	Rn-219	3.96 segundos	alfa-gamma
Po-218	3.05 minutos	alfa-gamma	Po-215	778 microseg.	alfa-gamma
Pb-214	26.8 minutos	beta-gamma	Pb-211	36.1 minutos	beta-gamma
Bi-214	19.9 minutos	beta-gamma	Bi-211	2.13 minutos	alfa-gamma
Po-214	63.7 microsegundos	alfa-gamma	Tl-207	4.77 minutos	beta-gamma
Pb-210	22.26 años	beta-gamma	Pb-207	Estable	-
Bi-210	5.013 días	beta-gamma			
Po-210	138.378 días	alfa-gamma			
Pb-206	estable	-			

En su cadena de desintegración el Uranio natural esta en equilibrio secular. Esto significa que en 1 gramo de Uranio natural, cada radionucleído de la serie U-238 tiene una actividad de 12356 Bq y cada radionucleído de la serie U-235 una actividad de 568 Bq. Sin embargo, durante las etapas de enriquecimiento el equilibrio secular se destruye.

Como se observa en la **Tabla 2**, la radiación predominante en los isótopos de Uranio (U-238, U-235, U-234) es alfa, lo cual implica un peligro de contaminación debido a ingestión o inhalación. La radiación beta de los productos de desintegración de vida corta Th-234 y Pa-234m, junto con la radiación gamma débil emitida por todos los nucleídos, presenta un peligro de radiación externa. La radiación beta, además, produce rayos X secundarios (Bremsstrahlung o radiación de frenado) en el UF<sub>6</sub> y en la pared del cilindro.

El peligro de radiación externa por presencia de neutrones debida a fisiones espontáneas es despreciable. Sin embargo, el riesgo aumenta con el enriquecimiento en los compuestos fluorados ya que el U-238 decae a Th-234 emitiendo una partícula alfa, que al reaccionar con F-19 libera un neutrón más Na-22, de acuerdo a la reacción  $^{19}\text{F}(\alpha, n)^{22}\text{Na}$ .

#### **4.2.1 Riesgo por contaminación interna**

Las principales vías de incorporación, del UF<sub>6</sub> y sus productos de hidrolisis, son:

- Inhalación
- Ingestión
- Por medio de heridas

La vía principal de incorporación es por inhalación de la nube tóxica.

En condiciones normales de operación, la actividad alfa de corto alcance del UF<sub>6</sub> no presenta riesgos dado que el material se encuentra confinado. El riesgo se origina si el material se escapa al ambiente de trabajo, por lo que la posibilidad de incorporar partículas alfa se incrementa.

La radiotoxicidad de los compuestos de Uranio está dada principalmente por la radiación alfa de corto alcance, por lo que se verán afectados aquellos órganos donde queden retenidas dichas partículas. Considerando que el UF<sub>6</sub> es un compuesto soluble de Uranio, el órgano más sensible es el riñón.

Según la Norma AR 6.1.1. Rev. 1 punto D de la Autoridad Regulatoria Nuclear, en locales sin restricción de acceso, la concentración de radionucleídos en aire no debe exceder 1/100 DAC. Además, ningún trabajador debe estar expuesto a concentraciones de radionucleídos en aire superiores a 1/10 DAC. Deben preverse medios de protección adecuados para las áreas donde estos niveles de contaminación radiactiva puedan ocurrir. El acceso a los locales donde la concentración de radionucleídos en aire exceda 1 DAC debe estar prevenido por una barrera física apropiada.

En nuestro caso, el Uranio presente en la instalación es Uranio soluble, por lo que su concentración derivada en aire (DAC) es  $13,78 \text{ Bq/m}^3$ . Con lo cual no se cubriría a los trabajadores de los riesgos toxicológicos, donde el límite, como se mencionó anteriormente, es  $5,2 \text{ Bq/m}^3$ . Por lo tanto, deberá utilizarse una fracción de este último valor que asegure que el personal está cubierto tanto respecto a los riesgos radiológicos como a los toxicológicos. Resumiendo:

- Límite radiológico (Uranio soluble, tipo de Uranio presente en la instalación) =  $13,01 \text{ Bq/m}^3$ .
- Límite toxicológico =  $5,20 \text{ Bq/m}^3$ .
- Límite operativo =  $1,01 \text{ Bq/m}^3$ .<sup>1</sup>

#### 4.2.2 Riesgo por criticidad

Tanto para el Uranio natural como en el levemente enriquecido, donde la concentración de U-235 es menor al 1%, los riesgos de criticidad son nulos. En nuestro caso, el enriquecimiento no superará el 0,9 % por lo que no habrá riesgos por criticidad.

## 5. MEDIDAS CONTRA LA INCORPORACIÓN

Las medidas de prevención contra la incorporación se dividen según dos puntos de vista:

- Cuestiones de diseño
- Aspectos ocupacionales

Desde el punto de vista del diseño, las medidas establecidas contra la incorporación son los sistemas de confinamiento, de retención y filtrado y la clasificación de las áreas de trabajo.

Dentro de los sistemas de confinamiento, las propias paredes del Laboratorio Mock Up, el mismo sistema que se encuentra en depresión y los tambores 32B, que contienen a la materia prima, son sistemas de confinamiento.

En referencia a los sistemas de retención y filtrado, estos son las trampas químicas y filtros de retención que evitan la salida del material al medio ambiente.

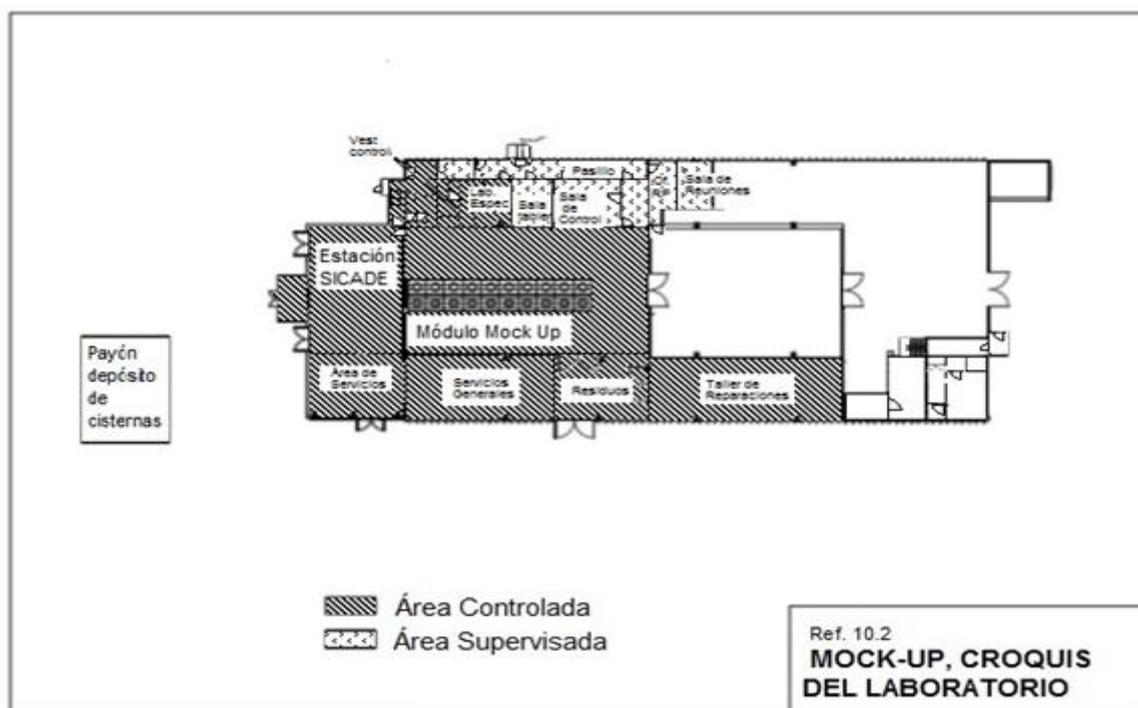
En cuanto a la clasificación de las áreas, éstas se dividen en:

- **ÁREA CONTROLADA:** Aquí se lleva a cabo control de acceso y monitoreo individual del personal.
- **ÁREAS SUPERVISADAS:** Aquí se revisan periódicamente las condiciones de trabajo pero no se monitorea individualmente al personal.

---

<sup>1</sup> Este valor coincide con el límite radiológico para el Uranio insoluble

A continuación se muestra un croquis del laboratorio con la diferenciación entre las dos áreas (**Fig. 6**).



**Fig. 6: Croquis del laboratorio Mock Up**

El área controlada está claramente señalizada mediante carteles indicadores y el acceso a la misma es restringido. Sólo se accede a ella mediante el permiso del Jefe de Turno.

En cuanto a los aspectos ocupacionales, las medidas de prevención contra la incorporación incluyen:

- Medidas de limpieza y rutinas de trabajo bien establecidas. En caso de prácticas no rutinarias, se realizará la programación de tareas.
- Medidas de protección al personal mediante la exigencia del uso de ropa de trabajo adecuada, guantes, máscaras con filtro que impidan inhalación de material acorde al área, tipo de material y tareas a realizar, tanto para situaciones rutinarias como no rutinarias.
- Establecimiento de un Plan de Monitoreo.

## 5.1 Protección del personal

Los distintos tipos de protección dependen del tipo de tarea a realizar, es decir:

- **Para la conexión de cisternas 32B** se utilizará mameluco, zapatos de seguridad, cubrezapatos, cofia, guantes tipo nitrilo y protección respiratoria tipo máscara facial completa con filtros de alta eficiencia combinados para Fluorhídrico y polvos de Uranio.

- **Para tareas rutinarias con el sistema cerrado** se utilizará guardapolvo, guantes descartables, cofia, anteojos de seguridad, zapatos de seguridad y cubrezapatos.
- **Para la conexión de tomamuestras** se utilizará mameluco, zapatos de seguridad, cubrezapatos, cofia, guantes tipo nitrilo y protección respiratoria tipo máscara facial completa con filtros.
- **Para tareas de mantenimiento y reemplazo de componentes con sistema cerrado** se utilizará mameluco, cofia, cubrezapatos, anteojos y zapatos de seguridad y guantes con mayor resistencia mecánica, por ejemplo: los guantes tipo nitrilo.
- **Para tareas de mantenimiento y reemplazo de componentes con sistema abierto** se utilizará máscara facial con filtros intercambiables. En caso que el oficial de Radioprotección acuse una mayor de protección se utilizará, además de todo lo mencionado con anterioridad, mameluco, zapatos de seguridad, cofia, cubrezapatos y guantes.
- **Para tareas de mantenimiento de equipos en sala de reparación y limpieza** se utilizará mameluco, zapatos de seguridad, cubrezapatos, cofia, guantes tipo nitrilo, y, de acuerdo a los resultados de las mediciones del ambiente laboral, se utilizará una semimáscara o barbijo.

## 5.2 Plan de monitoreo

El monitoreo es un conjunto de mediciones e interpretación de los resultados, que se realiza para evaluar la exposición a la radiación en el área de trabajo (Norma AR 10.1.1). Se clasifica en monitoreo de área y personal.

### 5.2.1 Monitoreo de área

El monitoreo de área se realiza mediante el control de la contaminación superficial, irradiación externa, concentración de contaminantes en el aire y concentración del HF presente.

#### 5.2.1.1 Contaminación superficial

Las mediciones pueden ser de dos tipos: directas o indirectas.

- **Mediciones directas:** Se realiza en superficies con un medidor de contaminación superficial portátil. En el Laboratorio Mock Up se utiliza el centellador Berthold LB 124- Scint de Sulfuro de Cinc (ZnS) activado con Plata (Ag). La técnica de medición consiste en medir la superficie lentamente, a fin de darle tiempo al equipo de detectar bajas contaminaciones.

Se trabajará con los siguientes límites recomendados para la contaminación superficial debido a emisores alfas (**Tabla 3**).

**Tabla 3: Límites de contaminación superficial recomendados**

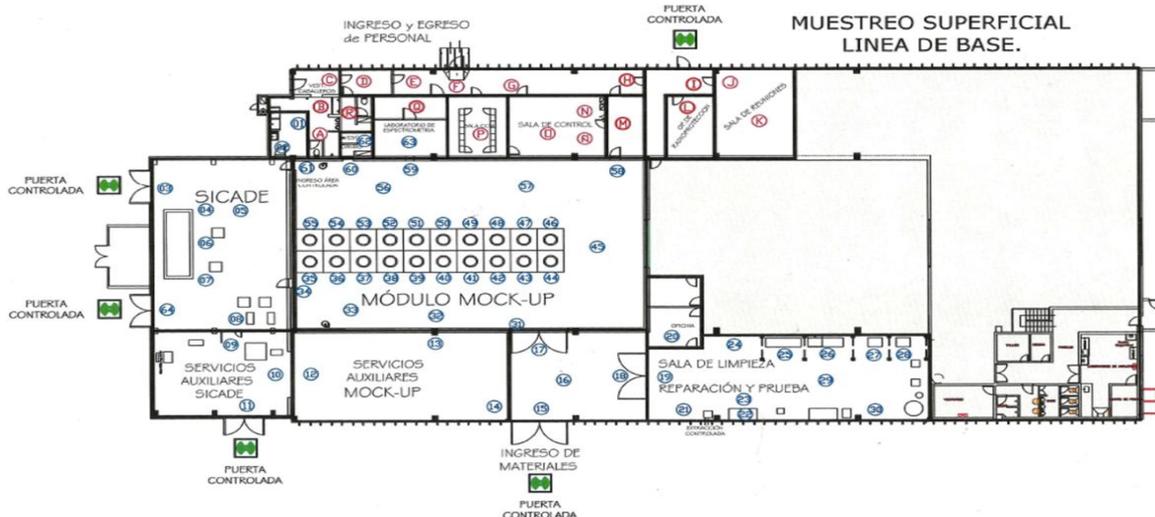
<b>SUPERFICIES</b>	<b>Bq/cm<sup>2</sup></b>
Herramientas de áreas controladas	0,04
Áreas inactivas	0,4
Áreas activas	4

- Mediciones indirectas: La técnica de medición consiste en frotar un trozo de papel absorbente contra una superficie y medir la tasa neta de cuentas (cps) del papel con un detector de contaminación superficial. Las superficies muestreadas son de 10 cm por 10 cm en piezas pequeñas o lugares de difícil acceso, y en superficies extensas (mesadas, pisos, etc.) son de 30 cm por 30 cm. Considerando que sólo se logra arrastrar el 10% de la actividad entonces, el factor de arrastre (fa) utilizado es 0,1.

$$As = \frac{\text{tasa neta de contaje (cps)}}{fa \times \text{Eficiencia} \left( \frac{\text{cps}}{\text{Bq}} \right) \times \text{área muestreada (cm}^2\text{)}}$$

Por el comportamiento típico de los aerosoles durante la liberación del UF<sub>6</sub> se monitorean solamente las superficies horizontales, donde existen mayores probabilidades de que se deposite el polvo de UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>. En el caso del laboratorio Mock Up, el equipo que se utiliza para las mediciones alfas es el centellador alfa/beta RadEye HEC.

Para la línea de base, en la instalación se ubicó una vasta cantidad de puntos de muestreo de manera de evaluar la contaminación superficial del fondo del Laboratorio Mock Up (**Fig. 7**). Si bien la cantidad de puntos seleccionados es elevada, como línea de base es de gran utilidad ya que el objetivo es suministrar cualquier información que permita detectar alguna tendencia durante las prácticas en operación normal.



**Fig. 7: Caracterización del fondo de la contaminación superficial (los puntos rojos son de área supervisada y los azules de área controlada)**

De los resultados obtenidos del monitoreo indirecto de superficie se sacó un promedio en cada área de interés radiológico (**Tabla 4**).

**Tabla 4: Resultados del monitoreo indirecto de superficie**

SECTOR DE MUESTREO	RESULTADO (Bq/cm <sup>2</sup> )
SICADE	$\leq 4,4 \times 10^{-4}$
Taller de compresores	$\leq 1,6 \times 10^{-3}$
Cascada	$\leq 2,4 \times 10^{-3}$

Teniendo en cuenta que el Laboratorio Mock Up se encuentra en la puesta en marcha, los resultados obtenidos de contaminación superficial en cada sector de interés son los esperados, ya que son valores de fondo provenientes de la instalación.

### 5.2.1.2 Irradiación externa

Como se mencionó con anterioridad, los riesgos por irradiación externa son bajos y sólo toman importancia en tareas específicas como por ejemplo las tareas de mantenimiento. Sin embargo, se mide la tasa de dosis en el área controlada diariamente mediante un contador Geiger RadEye B20 y un contador proporcional Radiámetro FH40 GL 10. Los sectores a monitorear son: SICADE y el Hall de Cascada.

### 5.2.1.3 Concentración de contaminantes en el aire

El objetivo es determinar la concentración de los contaminantes en el ambiente laboral y verificar las condiciones de radioprotección del sitio. Teniendo en cuenta que uno de los riesgos más probables es contaminación interna por inhalación de la nube tóxica, para la

medición de la concentración de contaminantes en el aire se utilizan dos procedimientos: uno de lectura diferida y otro de lectura directa.

**Medición de lectura diferida:** Como parte de los estudios preliminares para el diseño del monitoreo ocupacional se trazaron objetivos específicos detallados a continuación:

- ✓ Seleccionar las áreas de muestreo.
- ✓ Definir el número de puntos de muestreo de la concentración de aire y su distribución.
- ✓ Especificar equipos o componentes que conformarán el monitoreo.

Selección de las áreas de interés: Se realizó una evaluación en cuanto a los riesgos asociados a cada área. En primer lugar, se seleccionó la ESTACIÓN SICADE y el MÓDULO MOCK UP debido a que las mismas son áreas controladas por lo que requieren de controles para la exposición a la radiación y la prevención a la dispersión de la contaminación radiactiva (Norma AR 10.1.1 Rev. 3 y la AR. 6.1.1. Rev. 1). Son áreas críticas desde el punto de vista de la radioprotección.

Otra de las áreas seleccionadas es el TALLER DE REPARACIÓN DE COMPRESORES. Éste se eligió porque involucra tareas de mantenimiento, las cuales comprenden riesgos radiológicos de menor índole que en SICADE y MOCK UP, aunque también es necesario el monitoreo.

Por lo tanto, los puntos de muestreo se colocan donde se trabaja con el material radiactivo (Ref. 1) y en donde están los mayores riesgos radiológicos involucrados para los trabajadores.

Definición del número de puntos de muestreo y su distribución: Para definir el número de puntos de toma de muestras en las áreas críticas se utilizó el criterio de SALA LIMPIA (ISO 14644-1:1999), el cual especifica que el número mínimo de ubicaciones de los puntos de muestreo (NL) depende de la superficie de la sala (A):

$$NL = \sqrt{A}$$

Donde:

NL: Es el número mínimo de puntos de muestreo (redondeado a un número entero).

A: Es el área de la sala limpia o zona limpia (m<sup>2</sup>).

A partir de esto, para cada área seleccionada se llegó a las siguientes conclusiones:

ESTACIÓN SICADE: El área total es 70 m<sup>2</sup>. Dentro del SICADE, las zonas más críticas, por la presencia de material radiactivo, para la protección radiológica son dos: el depósito de cisternas y el de intercambiadores de calor. Aplicando la norma ISO 14644-1:1999, el área donde se encuentran las cisternas es de aproximadamente 9,6 m<sup>2</sup> (1,6 m x 6 m), por lo tanto:

$$NL = \sqrt{9,6 \text{ m}^2}$$
$$NL = 3$$

Por lo que, se colocará un equipo para cada cisterna.

Por otro lado, el área donde se encuentran los intercambiadores de calor es de aproximadamente  $10,8 \text{ m}^2$  ( $1,2 \text{ m} \times 9 \text{ m}$ ), por lo tanto:

$$\begin{aligned} NL &= \sqrt{10,8 \text{ m}^2} \\ NL &\approx 3 \end{aligned}$$

Se colocarán dos equipos muestreadores en los extremos y uno en el medio. En conclusión, el SICADE dispondrá, como mínimo, de 6 puntos de muestreo.

MODULO MOCK UP: El local contiene 20 difusores gaseosos que es la llamada área activa, es decir zona más crítica a nivel de la protección radiológica.

Área activa=  $19 \text{ m} \times 3 \text{ m}$

Área activa=  $57 \text{ m}^2$

Aplicando la norma ISO 14644-1:1999:

$$\begin{aligned} NL &= \sqrt{57 \text{ m}^2} \\ NL &= 7,5 = 8 \end{aligned}$$

Se colocarán 8 puntos de muestreo distribuidos equitativamente en la cascada.

TALLER DE REPARACIÓN DE COMPRESORES: El área total del taller es  $150 \text{ m}^2$ . Sin embargo, el área más comprometida respecto a la protección radiológica es la mesada de trabajo. Su superficie es aproximadamente de ( $4 \text{ m} \times 1,2 \text{ m}$ )  $4,8 \text{ m}^2$ .

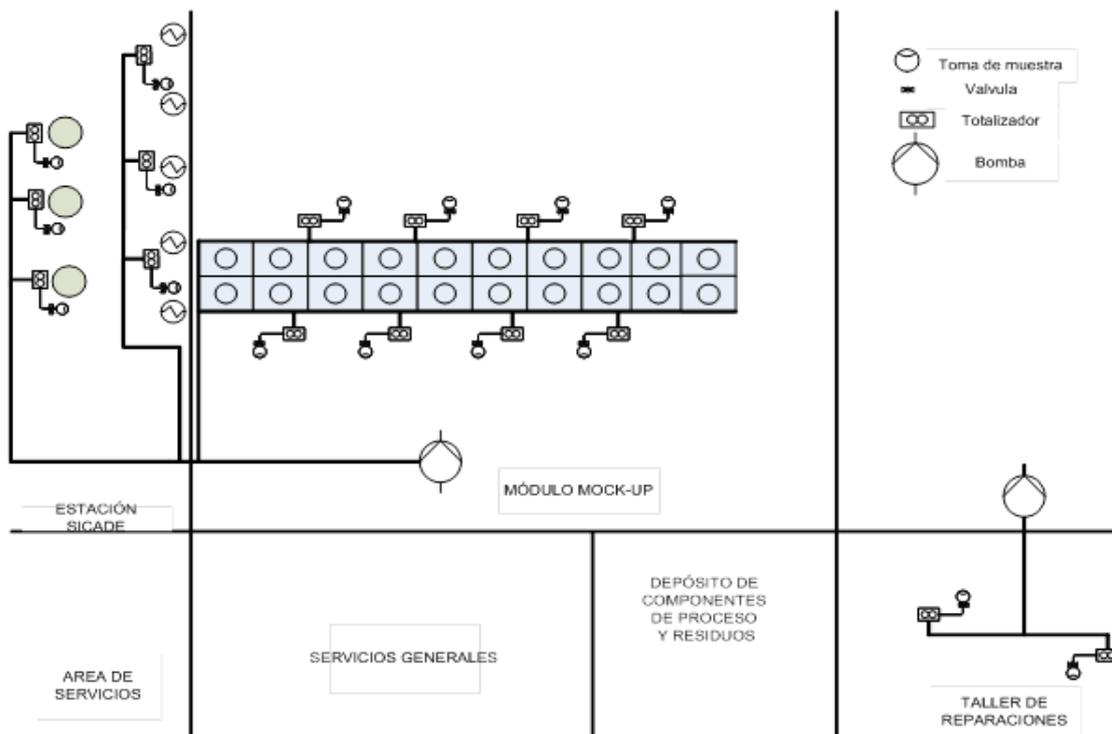
Aplicando la norma ISO 14644-1:1999:

$$\begin{aligned} NL &= \sqrt{4,8 \text{ m}^2} \\ NL &\approx 2 \end{aligned}$$

Por lo tanto, se colocarán 2 equipos muestreadores de aire. Uno de ellos se lo ubicará sobre la mesada de trabajo y el otro alejado de la zona de trabajo, de manera de utilizar este último como blanco.

Se puede apreciar que si bien la norma está preparada para “Salas Limpias” y para cuestiones convencionales, la cantidad mínima de puntos de muestreo es aceptable, quedando la posibilidad de acoplar más portafiltros una vez que se adquiera experiencia durante la operación de la planta.

Resumiendo, la cantidad mínima de puntos de muestreo en cada local es de 6 en el SICADE, 8 en el MOCK UP (zona de cascadas) y 2 en el TALLER DE COMPRESORES, llegando a un total de 16 puntos de muestreo, en cada uno de los cuales se colocará un equipo de recolección de muestra (**Fig. 8**).



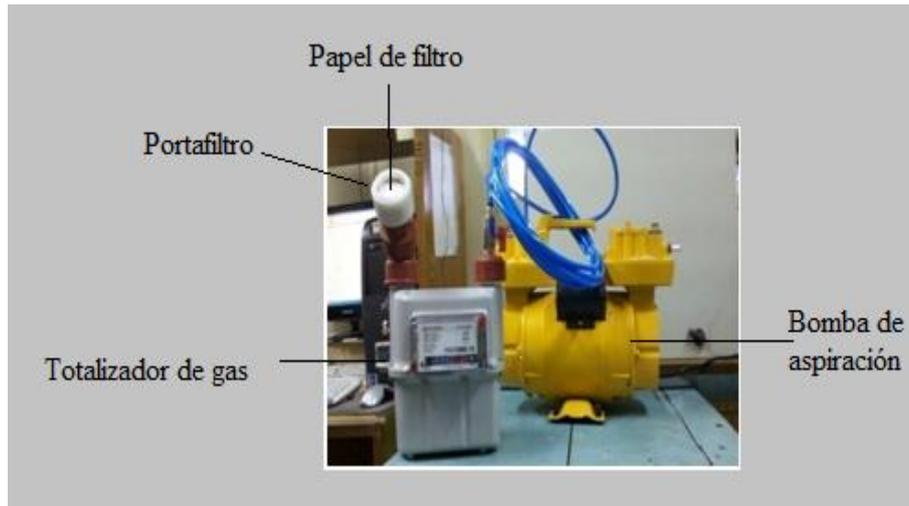
**Fig. 8: Ubicación de los puntos de muestreo**

Los equipos para tomar muestras se ubican en un lugar representativo de la condición radiológica, donde no dificulten la circulación, y la pérdida de carga en el sistema de extracción de muestras sea mínima. En este sentido, las alturas donde se ubican los portafiltros son:

- 1,6 - 2,2 metros: esta es una altura seleccionada desde el punto de vista radiológico, ya que es representativa de la respiración del hombre promedio.
- 0,5 metros: es una altura adecuada considerando que los productos de hidrólisis de la reacción del  $UF_6$  con la humedad ambiente tienden a depositarse.

Equipos y componentes que conforman el monitoreo: Cada equipo muestreador es de diseño propio. El mismo está integrado por un portafiltro adosado a un medidor totalizador de volumen (**Fig. 9**) al que se le suma una válvula, que permitirá la regulación del caudal y cerrar el paso de caudal para extraer el filtro durante su recambio. El totalizador de gas es un medidor de gas convencional que mide el volumen ( $m^3$ ) de pasaje por el portafiltro.

El vacío necesario para tomar las muestras es provisto por un sistema independiente del que dispone la planta. La bomba seleccionada es una bomba de turbina regenerativa, ya que es silenciosa, requiere menos mantenimiento y es menos costosa. Para el Mock-up y Sicafe la bomba seleccionada tiene un caudal máximo de  $150 m^3/hora$ , una caída de presión máxima en el aspirador y el compresor de 270 mbar. Funciona con corriente alterna trifásica, su construcción es blindada en 100% con protección IP 55, con acople directo y al rotor. Para el Taller de Reparación de Compresores la bomba tiene un caudal de  $10 m^3/h$ , su caudal máximo es de  $80 m^3/h$  y la caída de presión máxima en el aspirador y en el compresor es de 130 mbar.



**Fig. 9: Componentes del equipo muestreador**

Existe diversidad de tipos de papel de filtro: los celulósicos, los de membrana y los de fibra de vidrio. Sin embargo, se selecciona el de FIBRA DE VIDRIO de 47 mm de diámetro con un tamaño de poro de 5 micrones, debido a sus ventajas:

- Tasa de retención del orden de las submicras.
- Permite caudales elevados y altas capacidades de carga con la retención de partículas muy finas.
- Debido al elevado volumen hueco de los filtros de fibras de vidrio, las pruebas de retención demuestran una prolongación de la vida útil del filtro considerable en comparación con un filtro de celulosa de retención similar.
- Múltiples mecanismos de retención.
- Amplia distribución de tamaño de poro.
- Los filtros de fibras de vidrio sin ligantes poseen una resistencia a la temperatura de hasta 550°C, lo cual es importante en la planta de enriquecimiento donde se alcanzan en el Mock Up temperaturas mayores a 50°C.
- Eficiencia de aproximadamente 99,99%.

La principal desventaja es que en general los papeles de filtro de fibra de vidrio presentan mayor cantidad de Uranio intrínseco.

Una vez finalizado el diseño, la siguiente etapa fue realizar pruebas para definir el caudal, la frecuencia de cambio de filtros, y el procedimiento de medición que permita obtener la sensibilidad requerida. Es decir, es imprescindible que se detecte la centésima del DAC ( $0,01 \text{ Bq/m}^3$ ), de manera de cubrir los riesgos radiológicos como los toxicológicos.

Para la definición del caudal de pasaje, se fija un volumen arbitrario de 300 litros. Se mide con un cronómetro el tiempo que tarda cada medidor de gas convencional en

alcanzar dicho volumen y se saca el promedio de los tiempos de cada totalizador. Con esta información se calcula el caudal de la siguiente manera:

$$\text{Caudal } \left( \frac{\text{L}}{\text{min.}} \right) = \frac{\text{Volumen (300 L)}}{\text{Tiempo promedio (min.)}}$$

El caudal arrojó un valor de 90 L/min. Este valor, en conjunto con la frecuencia de cambio de filtro, y del procedimiento de medición, debe permitir detectar la centésima del DAC (1% DAC). Si con este caudal calculado no se alcanzara a detectar el 1% del DAC se definiría otro caudal de pasaje con las válvulas de regulación presente en el sistema. Pero como primera aproximación se fija los 90 L/min.

Fijado el caudal, el siguiente paso es definir el período de muestreo del aire de locales. Se evalúan dos posibilidades: un período de muestreo de 7 días o un período de muestreo de 14 días. Para la primera opción, se deja el sistema de toma de muestra de aire de locales funcionando una semana (7 días). Finalizado este período, se cierra la válvula de pasaje de aire y se registra el volumen del medidor de gas convencional (totalizador de gas). Se retira el papel de filtro y se mide la actividad recolectada en el mismo con el equipo RadEye HEC. Por último, se obtiene la concentración en actividad ( $\text{Bq/m}^3$ ) mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Concentración } \left( \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\text{Actividad (Bq)}}{\text{Volumen (m}^3\text{)}}$$

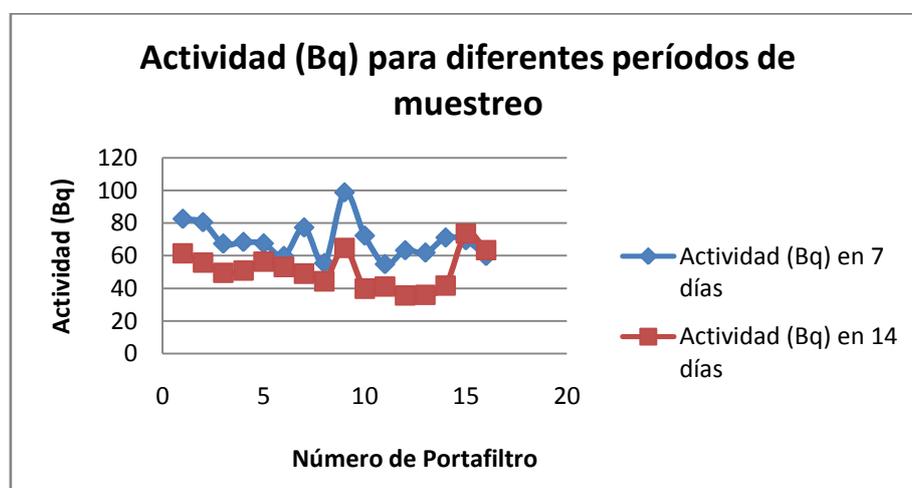
Al valor de concentración en actividad obtenida se lo compara con la centésima del DAC ( $0,01 \text{ Bq/m}^3$ ), ya que la concentración obtenida debe ser menor de manera de obtener la sensibilidad requerida de la medición. El mismo procedimiento se repitió pero teniendo en cuenta un período de muestreo de 14 días.

Un muestreo menor a 7 días no es aplicable ya que no se llega a detectar  $0,01 \text{ Bq/m}^3$ . Los resultados obtenidos para los diferentes períodos de muestreo se aprecian en la **Tabla 5**.

**Tabla 5: Actividad (Bq) en el papel de filtro para los diferentes portafiltros según el período de muestreo.**

N° de portafiltro	Actividad (Bq) a 7 días	Actividad (Bq) a 14 días
1	82,60	61,5
2	80,50	55,8
3	67,40	49,6
4	68,40	50,9
5	67,50	56,4
6	59,80	53,2
7	77,30	49,1
8	55,40	44,4
9	98,80	64,8
10	72,30	39,9
11	54,80	41,2
12	63,30	35,7
13	61,90	36,00
14	71,10	41,70
15	69,40	73,60
16	59,80	63,40

Graficando estos valores de actividad (Bq) para cada período de muestreo estudiado y para cada portafiltro se obtiene lo siguiente (**Fig. 10**):



**Fig. 10: Actividad (Bq) en los filtros según el período de muestreo.**

Como se observa en la **Tabla 5** y la **Fig. 10**, a los 14 días el valor de actividad (Bq) detectado es menor que el valor recolectado durante una semana, y esto es debido a que se recolectó, aparte de actividad alfa, grandes cantidades de polvo y tierra procedentes de la misma instalación. Esto provocaba que la medición disminuya respecto a la medición semanal porque las partículas alfa de corto alcance se atenuaban con la tierra y polvo colectado y no todas llegaban al detector. Entonces, se decidió que el período de muestreo debe ser semanal. Es decir, cada 7 días se retirarán los papeles de filtro de los 16 portafiltros y se procederá a la medición de los mismos.

La última cuestión es determinar el procedimiento de la medición. Para eso es necesario tener en cuenta los interferentes en la medición, como los radionucleidos de origen natural: el Radón, el Torón y sus productos de desintegración. Estos suelen encontrarse en todos los ambientes en concentraciones más altas que los isótopos de interés, por lo que interfieren en el análisis radiométrico, a menos que se deje decaer a las progenies de corta duración.

Los derivados del Radón, que son mucho más abundantes que los del Torón en la mayoría de las áreas, tienen una vida media máxima de unos 30 minutos. Es decir, que un retardo en la medición de la actividad del papel de filtro de 3 horas puede ser adecuado para eliminar a las progenies del Radón. Las progenies del Torón decae con una vida media máxima de 10,6 horas, y en este caso un retraso en la medición de 3 días es lo aconsejable.

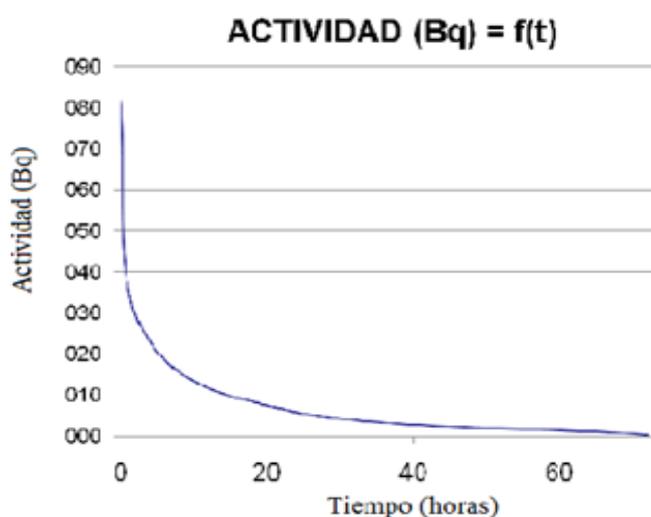
Por lo que es necesario definir si al papel de filtro se mide inmediatamente finalizado el período de muestreo o esperamos un tiempo considerable de manera que decaigan las partículas alfa procedentes de la radiación natural y se obtenga la sensibilidad requerida de medición. El Laboratorio Mock Up para la medición utiliza el centellador alfa/beta RadEye HEC.

Entonces, se procede a dejar el sistema funcionando una semana (período de muestreo seleccionado anteriormente). Considerando los períodos de decaimiento de las progenies del Radón y Torón, la medición de la actividad en el papel de filtro se realiza en diferentes momentos: inmediatamente finalizado el período de muestreo, a las 3 horas donde se elimina a las hijas del Radón (Rn-222), a las 24 hs para observar si se alcanza la sensibilidad adecuada y a los 3 días donde se elimina a las hijas del Torón (Rn-220). Los valores de actividad de fondo de cada papel de filtro en los diferentes momentos se presentan en la **Tabla 6**.

**Tabla 6: Valores de actividad de fondo durante la puesta en marcha**

N° de portafiltro	Actividad (Bq)			
	Tiempo= 0	Tiempo= 3 horas	Tiempo= 1 día	Tiempo= 3 días
1	82,60	26,10	6,00	0,50
2	80,50	29,00	6,80	0,70
3	67,40	23,70	5,70	0,20
4	68,40	21,70	6,70	0,10
5	67,50	25,70	5,30	0,20
6	59,80	26,30	5,70	0,80
7	77,30	40,60	8,40	0,30
8	55,40	28,30	6,70	0,50
9	98,80	31,10	8,40	0,50
10	72,30	32,00	9,00	0,50
11	54,80	28,80	6,90	0,30
12	63,30	28,70	8,10	0,30
13	61,90	31,90	7,30	0,30
14	71,10	37,60	9,70	0,60
15	69,40	45,30	13,00	0,30
16	59,80	41,20	10,40	0,60

En la tabla anterior, se observa la influencia de las progenies del Radón en la medición. La medición a tiempo cero involucra a la actividad total alfa debida al Uranio y a la radiación natural presente. Tomando como ejemplo el portafiltro número 1 y graficando la actividad en función del tiempo (**Fig. 11**), se observa que a las 3 horas la actividad alfa decae un 32%, lo cual muestra que el decaimiento se debe a actividad alfa de las progenies de corta vida del Radón.



**Fig. 11: Decaimiento en el portafiltro N° 1.**

En nuestro caso, el límite de detección de la técnica utilizada debe poder detectar 0,01 Bq/m<sup>3</sup>.

Por lo que, concluimos que al medir el papel de filtro inmediatamente finalizado el período de muestreo (tiempo cero), la sensibilidad es menor debido a que el fondo natural es muy elevado y cercano al valor de la medición propiamente dicha. Por otro lado, al calcular el límite de detección a tiempo cero este arrojaba un valor mayor a 0,01 Bq/m<sup>3</sup>. Es decir, no detectaría en situación de operación normal la concentración de interés.

Por otro lado, medir el papel de filtro dejándolo reposar tres días de concluido el período de muestreo aumenta la sensibilidad de la medición porque el fondo natural disminuye (las progenies del Radón y Torón decayeron) y, al calcular el límite de detección este es menor al 1% del DAC (0,01 Bq/m<sup>3</sup>). Es decir, con este límite de detección se podría detectar la centésima del DAC, requisito establecido por la Autoridad Regulatoria Nuclear.

En conclusión, el papel de filtro se medirá 3 días después de haber finalizado el período de muestreo. De ésta manera, se elimina por decaimiento la radiación natural debida a las progenies del Radón y el Torón, se disminuye el fondo natural obteniendo la actividad correspondiente enteramente al Uranio y se mejora la sensibilidad del método.

Definido el caudal, frecuencia de muestreo y el procedimiento de medición, se midió la actividad de todos los papeles de filtro cada semana durante 8 semanas y se sacó un promedio para cada portafiltro. Esto permitió obtener una buena caracterización del fondo del aire del Laboratorio Mock Up. Luego se calculó el promedio total de los promedios de las concentraciones de los portafiltros, el cual arrojó  $5,7 \times 10^{-4}$  Bq/m<sup>3</sup> (**Tabla 7**). Se concluye que concentraciones en actividad en los papeles de filtro durante operación normal que superen este valor serán considerados valores de investigación y serán enviados al laboratorio para ser analizados con mayor detalle.

**Tabla 7: Promedios de las concentraciones y nivel de investigación (NI) adoptado.**

Nº de portafiltro y su papel de filtro	Concentración
	(Bq/m <sup>3</sup> )
1	5,7x10 <sup>-4</sup>
2	9,8 x10 <sup>-4</sup>
3	2,7 x10 <sup>-4</sup>
4	1,4 x10 <sup>-4</sup>
5	2,5 x10 <sup>-4</sup>
6	1,1 x10 <sup>-3</sup>
7	4,4 x10 <sup>-4</sup>
8	7,1 x10 <sup>-4</sup>
9	7,3 x10 <sup>-4</sup>
10	6,4 x10 <sup>-4</sup>
11	3,8 x10 <sup>-4</sup>
12	4,8 x10 <sup>-4</sup>
13	4,2 x10 <sup>-4</sup>
14	8,4 x10 <sup>-4</sup>
15	3,6 x10 <sup>-4</sup>
16	7,4 x10 <sup>-4</sup>
<b>PROMEDIO (NI)</b>	<b>5,7 x10<sup>-4</sup></b>

**Medición de lectura directa:** Para la misma se utiliza un monitor continuo de lectura directa con niveles de alarma seleccionables en fracciones de DAC (**Fig. 12**). El mismo funciona de forma permanente en el área de MOCK UP y SICADE.



**Fig. 12: Monitor continuo de aire Alfa-7.**

Considerando que el equipo mide concentración derivada de aire (DAC), era necesario definir el valor de DAC de fondo de la instalación. Entonces, para comenzar con el estudio de los valores de fondo de la concentración de Uranio en el aire del ambiente de trabajo se toma muestras de aire con un muestreador RADECO y filtros de calidad HEPA durante la puesta en marcha.

Se coloca el muestreador 3 horas continuas resultando un caudal de 22,5 m<sup>3</sup>. Luego se analiza los papeles de filtro por espectrometría alfa (**Tabla 8**).

**Tabla 8: Resultados de la medición del papel de filtro por espectrometría alfa**

<b>Radionucleído</b>	<b>Actividad del filtro A (Bq)</b>	<b>Concentración C (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	<b>(C/DAC) U insoluble</b>	<b>(C/DAC) U soluble</b>
Uranio natural	1,6x10 <sup>-2</sup>	7,1x10 <sup>-4</sup>	6,5x10 <sup>-4</sup>	5,2x10 <sup>-3</sup>

Los valores de concentración derivada en aire del fondo de la instalación sirven como parámetro para cuando la planta comience con la operación normal. Es decir, valores arrojados por el monitor continuo Alfa 7 mayores a los valores de base mencionados en la **Tabla 8** serán considerados de investigación y serán enviados al laboratorio para un análisis más detallado.

#### **5.2.1.4 Medición HF**

Si bien el HF no es un compuesto radiológico, tiene gran implicancia dentro de lo toxicológico. Por lo que, se colocó un detector en una posición fija dentro de la sala de espectrometría y uno móvil para hacer mapeo en zona de procesos. La alarma visual se fija en el límite admisible de HF en el aire, es decir 3 ppm.

### **5.2.2 Monitoreo Personal**

Aquí se monitorea la posibilidad de riesgo por irradiación externa y contaminación externa e interna.

#### **5.2.2.1 Irradiación externa**

Teniendo en cuenta lo mencionado en los riesgos asociados al UF<sub>6</sub> (punto 4.2), no es necesaria la provisión de blindajes o equipos de protección, ni el uso de dosímetros ya que la radiación gamma es débil y de baja energía, aunque se evaluarán casos puntuales como las tareas de mantenimientos donde el material quede expuesto al personal.

#### **5.2.2.2 Contaminación externa**

La contaminación externa se controla con un monitor de pie y manos. Además, se realiza un mapeo de ropa con un Radiómetro RadEye AB100 y una sonda (FHZ 724) asociada.

Se trabaja con los límites para emisores alfa presentados en la **Tabla 9**.

**Tabla 9: Límites recomendados de contaminación superficial**

Superficies	Concentración (Bq/cm <sup>2</sup> )
Piel y manos **	0,04
Ropa y objetos personales	0,04

\*\* Manos y partes del cuerpo en general (no incluye ojos, gónadas, etc.).

### 5.2.2.3 Contaminación interna

Para la contaminación interna se desarrolla un programa de dosimetría interna, donde se determina la frecuencia adecuada de medición de la orina mediante modelos biocinéticos para compuestos solubles de Uranio. Además, se selecciona la técnica adecuada de medición, de Uranio en orina, con su límite de detección asociado.

En primer lugar, es necesario aclarar que la contaminación interna se clasifica según el tipo de incorporación:

- Incorporación crónica
- Incorporación aguda.

La incorporación crónica del material es de forma continua en el tiempo debido a las condiciones del ambiente de trabajo. Sin embargo, la incorporación aguda del material referencia a un único evento de incorporación en el cual el trabajador incorpora una cantidad determinada de material.

Teniendo en cuenta que el plan de monitoreo usa Niveles de Referencia como indicadores de las acciones a seguir en el control del personal expuesto, a fin de no exceder los límites autorizados, el personal debe realizarse muestreos rutinarios de orina. Los muestreos de orina, en caso del Laboratorio Mock Up, se realizan cada 90 días y los mismos se envían al laboratorio para la medición del Uranio en orina por Fluorimetría, con un límite de detección de la técnica de 0,5 µgU/L.

En este caso, el compuesto de Uranio presente en la instalación es el Hexafluoruro de Uranio (UF<sub>6</sub>). Según la IRCP 68 el mismo es un compuesto Tipo F, es decir un compuesto soluble en fluidos biológicos, donde se transfiere el 100 % del material incorporado en un tiempo medio biológico de 10 minutos. Hay que recordar que en la incorporación de la mayoría de los compuestos de Uranio natural transferible (tipo F) de bajo grado de enriquecimiento (hasta un enriquecimiento que varía del 5 al 8 % en U-235), como es el caso del Laboratorio Mock Up, prima el riesgo por toxicidad química.

Además, según el ICRP 26 y 35 se recomienda establecer Niveles de Investigación (NI) que permitan detectar a tiempo una incorporación de una fracción del ALI, se adopta 1/3 del ALI.

A partir de esto, se confecciona la **Tabla 10** con los resultados de los porcentajes de ALI que pueden ser detectados según el Límite de Detección adoptado por la técnica del laboratorio (0,5 µgU/L).

Para el cálculo de los porcentajes del ALI correspondiente a la incorporación aguda, se parte de calcular la incorporación propiamente dicha:

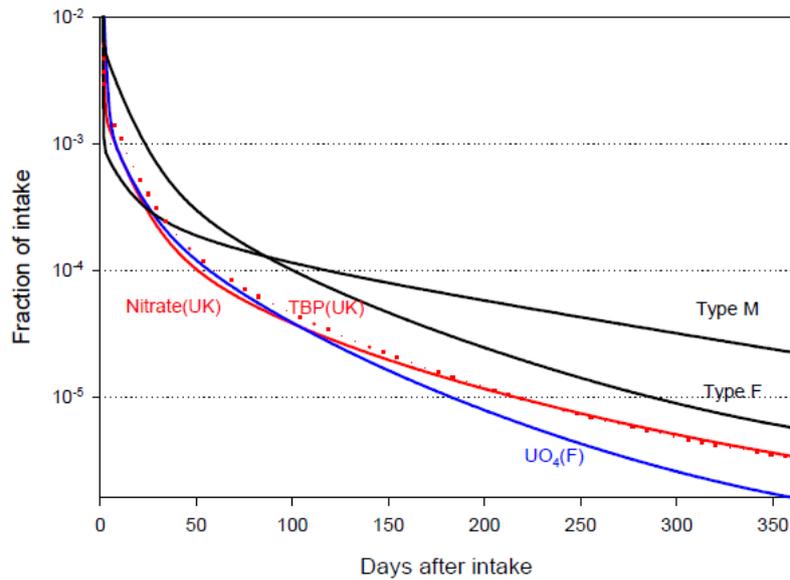
$$\text{Incorporación} = \frac{(\text{LD} \times \text{V})}{\text{fa}}$$

Donde:

LD: límite de detección (0,5 µgU/L).

V: volumen excretado diario (1,6 L).

fa: fracción excretada de Uranio en orina debido a una incorporación aguda. El valor de fa se extrae de la **Fig. 13**, el mismo es  $1,2 \times 10^{-4}$ . Se utilizó la interpolación gráfica.



**Fig. 13: Fracción excretada de Uranio en orina debida a una incorporación aguda (Ref. 4).**

Con el valor de la incorporación, se calculó el porcentaje del ALI por medio de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ ALI} = \frac{\text{Incorporación} \times 100}{\text{ALI}}$$

Por otro lado, para la incorporación crónica se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Incorporación} = \left( \frac{(\text{LD} \times \text{V})}{\text{fc}} \right) \times \text{d}$$

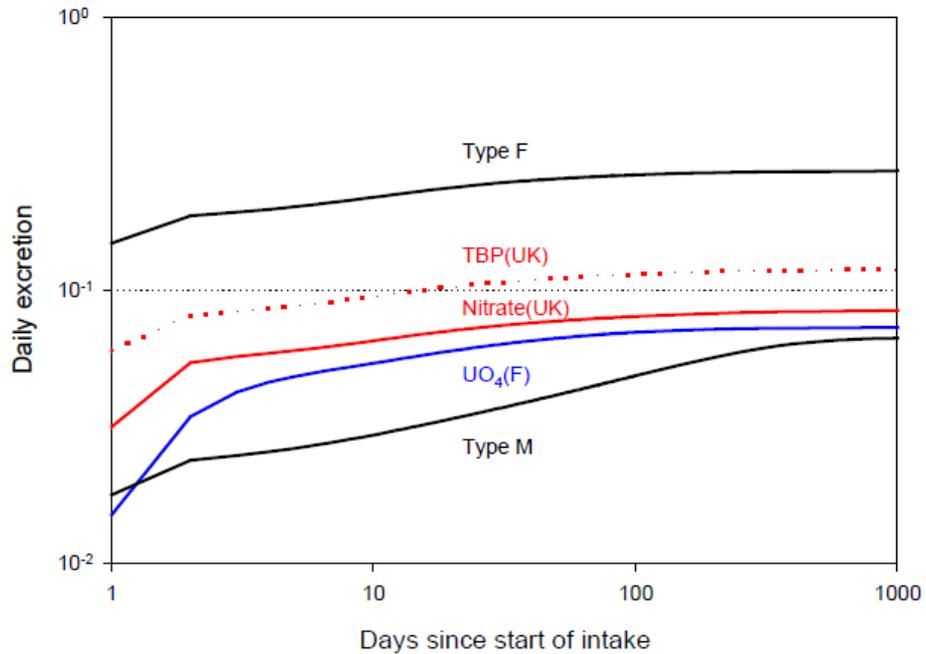
Donde:

LD: límite de detección (0,5 µgU/L).

V: volumen excretado diario (1,6 L).

d: número de días del período de muestreo (90).

fc: fracción excretada de Uranio debido a una incorporación crónica. El valor de fc se extrae de la **Fig. 14**, el mismo es 0,27. Se utilizó la interpolación gráfica.



**Fig. 14: Fracción excretada de Uranio en orina por unidad de incorporación crónica (Ref. 4)**

Con el valor de la incorporación crónica, se calculó el porcentaje del ALI por medio de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ ALI} = \frac{\text{Incorporación} \times 100}{\text{ALI}}$$

Para obtener el nivel de investigación se utilizó la siguiente ecuación:

$$NI = \frac{\left(\frac{\text{ALI}}{3}\right) \times fa \times 1000}{V}$$

Aplicando las ecuaciones mencionadas con anterioridad según el tipo de incorporación y sabiendo que el Uranio en la instalación es natural y su límite anual de incorporación (ALI) es 1312,2 mg se obtuvo los resultados presentados en la **Tabla 10**.

**Tabla 10: Porcentajes de ALI según el tipo de incorporación y Nivel de investigación.**

Uranio Natural	I. aguda (mg)	I. crónica (mg)	%ALI agudo	%ALI crónico	(1/3)* ALI	NI (µg/L)
Tipo F	6,7	0,3	0,5	0,02	437,4	32,8

Se verifica que el Límite de Detección de la técnica de laboratorio que se utiliza es menor que el Nivel de Investigación, permitiendo detectar de esta manera el tercio del valor del ALI. Es decir, se garantiza que, en el caso de que un trabajador incorpore en forma aguda una cantidad de Uranio durante el período de 90 días, se pueda detectar en el control de orina una tercera parte del ALI en la condición más pesimista, es decir con una incorporación el día inmediatamente posterior al último día de muestreo.

Otro tipo de monitoreo se establece para el desarrollo de tareas específicas y programadas donde se utiliza el dosímetro personal Myriam (**Fig. 15**) con un filtro Politetrafluoruro de Etileno (PTFE), el cual determina la dosis de inhalación derivada de la exposición de los radionucleído alfa y beta de larga vida.



**Fig. 15: Dosímetro personal - Myriam con filtro PTFE**

Es necesario aclarar que el equipo discrimina automáticamente la radiación natural, arrojando las cuentas totales pertenecientes únicamente al Uranio. Con este equipo se tomaron valores de fondo de la instalación y se calculó el límite de detección. El mismo cubre al personal tanto de los riesgos toxicológicos como radiológicos.

## **6. CONCLUSIÓN**

Los ensayos llevados a cabo permiten concluir que la instalación reúne las condiciones para su operación en condiciones seguras. En ese sentido, pudo verificarse que los procedimientos operativos para todas las situaciones previstas de la instalación son apropiados y los límites de operación establecidos son adecuados y practicables.

Debido a las precauciones que se tuvieron en consideración se cubrieron los riesgos radiológicos y toxicológicos del Uranio.

Las mediciones realizadas permiten conocer las condiciones de la instalación al momento del inicio de las operaciones, lo que posibilitará comparaciones futuras con dichas mediciones con el objetivo de detectar tendencias, así como evaluar el progreso y la eficacia de las medidas de protección de los trabajadores.

## 7. REFERENCIAS

- 1- DOE, US Department of Energy, Whashington D.C. 20585. "Guide of good practices for occupational radiological protection in uranium facilities. July 2009.
- 2- IAEA. "Comparission of high efficiency particulate filter testing methods". 1985
- 3- United States Enrichment Corporation Uranium Hexafluoride. "A manual of good handling practices". Enero 1995.
- 4- N Satradling, A. Hodgson, E. Ansoborlo, P. Berard, G. Etherington, T. Fell., E. Rance, B. Le Guen, European Commission. NRPB-W22. "Industrial Uranium compounds: Exposure limits, Assessment of intake and toxicity after inhalation". Agosto 2002.
- 5- Nuclear Regulatory Commission. "Gaseous Diffusion Uranium Enrichment Process". <http://www.nrc.gov/images/materials/fuel-cycle-fac/enrichment-process.gif> .
- 6- Environmental Science Division of Argonne National Laboratory. United States Department of Energy (DOE), Office of Environmental Management (EM). "Uranium Hexafluoride and Its Properties". <http://web.ead.anl.gov/uranium/guide/uf6/index.cfm>
- 7- WISE Uranium Project. "Uranium toxicity". <http://www.wise-uranium.org/utox.html> . 26 July 2011.
- 8- U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES Agency for Toxic Substances and Disease Registry. "Toxicological profile for uranium". <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp150.pdf> . Febrero 2013.
- 9- International Organization for Standardization. ISO 14644-1anexo B: "Salas limpias y ambientes controlados relacionados". 1999.
- 10- International Commission of Radiological Protection. ICRP 68: "Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers". 1994.
- 11- International Commission of Radiological Protection. ICRP 26: "Recommendation of the ICRP". 1977
- 12- International Commission of Radiological Protection. ICRP 35: "General Principles of Monitoring for Radiation Protection of Workers". 1982.
- 13- Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN). Norma AR 10.1.1: "Norma Básica de Seguridad Radiológica". Rev. 3. Argentina. Noviembre del 2001.
- 14- Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN). Norma AR 6.1.1: "Exposición ocupacional de instalaciones radiactivas Clase I". Rev. 1. Argentina. Enero del 2002.